

УДК 621.914.1

Ю.Н. Внуков, д-р техн. наук, А.И. Гермашев,  
С.И. Дядя, канд. техн. наук, Е.Б. Козлова, Запорожье, Украина

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ КОНТАКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА С ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛЬЮ ПРИ ЕЕ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

*У статті описана методика визначення умов контакту інструменту з тонкостінною деталлю при її кінцевому фрезеруванні, яка дозволяє визначати точки входу і виходу фрези із зацеплення з припуском, а також ділянки виходу інструменту при проходженні дуги його контакту з деталлю. Показана зміна вигляду контакту зуба фрези з тонкостінною деталлю при збільшенні швидкості обертання шпинделя.*

*В статье описана методика определения условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при ее концевом фрезеровании, которая позволяет определять точки входа и выхода фрезы из зацепления с припуском, а также участки выхода инструмента при прохождении дуги его контакта с деталью. Показано изменение вида контактирования зуба фрезы с тонкостенной деталью при увеличении скорости вращения шпинделя.*

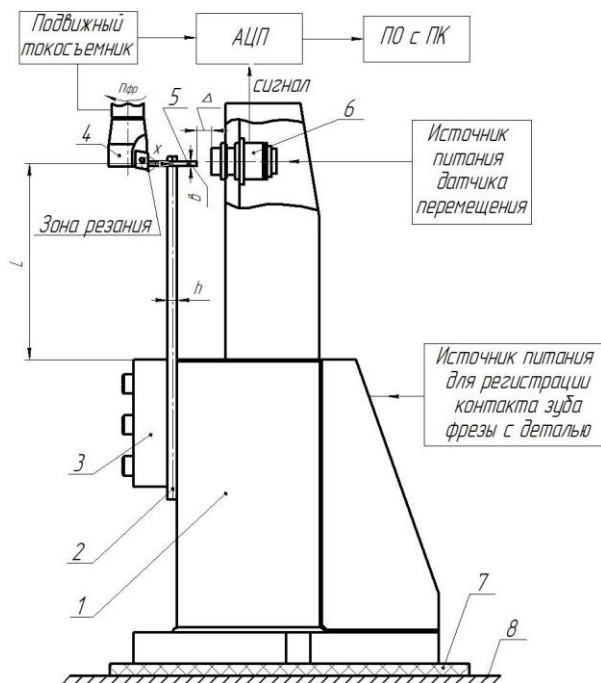
*This article shows the methodology of contact condition determination of tool and thin walled detail in end milling. Current methodology allow to determine points of tooth entrance, points of tooth exit from the engagement of tooth and workpiece and point of tooth exit from the allowance. Also is shown forms of contact of milling tooth with thin walled detail in different spindle speed.*

Тонкостенные элементы монолитных деталей, используемых в авиадвигателестроении, в большинстве случаев получают путем концевого фрезерования на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Удаление припуска происходит с риском попадания детали в нестабильные вибрационные условия обработки, в которых ухудшается шероховатость и нарушается размерная точность. Одновременно это влечет за собой снижение стойкости инструмента и ведет к преждевременному изнашиванию шпиндельного узла станка. На финишных операциях, где снятие припуска осуществляется с малыми радиальными и осевыми глубинами, всегда наблюдается кратковременная потеря контакта инструмента с деталью в процессе срезания припуска.

Для обеспечения стабильных условий резания и требуемых параметров качества обработанной поверхности необходимо минимизировать колебания тонкостенной детали путем использования различных технологических приемов. В настоящее время современные датчики, возможность оцифровки сигнала и запоминания неограниченных информационных объемов с помощью IT технологий позволяют с высокой точностью производить измерение отклонений и вибраций детали (инструмента) в процессе

механической обработки. Однако непосредственное определение условий контактирования зуба фрезы с деталью в зоне резания является более сложной задачей, хотя по своей значимости для обеспечения стабильных условий срезания припуска она является более важной.

Авторами разработано устройство для исследования условий контактирования инструмента с деталью при концевом фрезеровании тонкостенных деталей (рис. 1).



1 – Массивное основание станда; 2 – Упругая система (УС) тонкостенной детали (тонкостенная пластина); 3 – Прижим; 4 – Концевая фреза; 5 – Обрабатываемый образец; 6 – Датчик перемещения; 7 – Электроизолятор; 8 – Стол фрезерного станка

Рисунок 1 – Общая схема станда [1] и устройства для исследования условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при её концевом фрезеровании

Реализация работы устройства осуществляется с помощью станда для исследования процессов концевой фрезерования [1]. Массивное основание станда – 1 устанавливается на столе фрезерного станка через электроизоляцию – 7. К основанию жестко крепится прижимом – 3 тонкостенная пластина – 2, которая моделирует упругую систему

тонкостенной детали. На пластине жестко закрепляется обрабатываемый образец – 5. При фрезеровании, в результате действия силы отжима со стороны фрезы, происходит перемещение образца – 5, величину которого измеряют датчиком перемещения – 6 по изменению зазора –  $\Delta$ . К измерительному стенду подводится низковольтный источник питания. При контакте зуба фрезы – 4 с обрабатываемым образцом – 5 электрический сигнал передается через подвижный токосъемник на АЦП. Запись сигнала с токосъемника и сигнала перемещения образца с датчика – 6 осуществляется одновременно. Это дает возможность с высокой точностью совмещать осциллограмму отклонения детали во время обработки и сигнал наличия контакта между зубом фрезы и обрабатываемым образцом (деталью) (рис. 2).

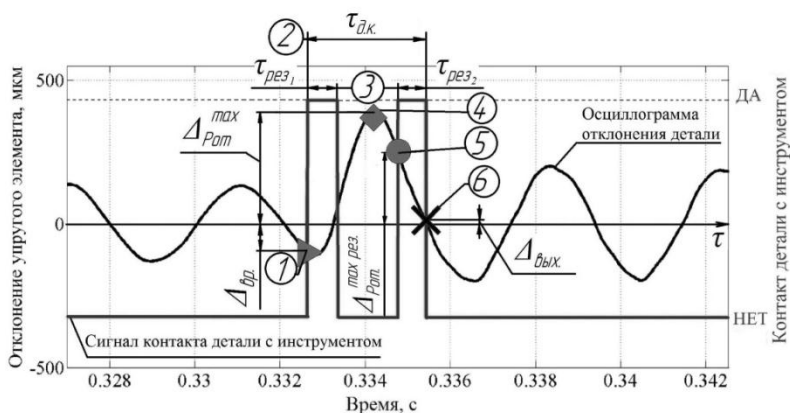


Рисунок 2 – Методика определения условий контактирования инструмента с деталью при цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей (попутное фрезерование,  $n=1800$  об/мин,  $S_z=0,05$  мм/зуб,  $a_c=0,5$  мм,  $a_p=3,4$  мм)

Высокоточное совмещение двух сигналов позволяет определять момент начала контактирования зуба фрезы с обрабатываемым образцом, участки выхода фрезы из зацепления с припуском в пределах дуги их контакта и момент окончания резания. На основе этих данных была разработана методика исследования условий контактирования инструмента с деталью при цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей. Оценка исследуемых параметров осуществляется в течении всей обработки, то есть анализируется резание каждым зубом фрезы. Таким образом, данная методика позволяет изучать:

1. **Отклонение детали от положения её равновесия -  $\Delta_{вр}$  в момент начала резания (точка врезания фрезы)** (рис. 2). В связи с тем, что

тонкостенные детали обладают невысокой жесткостью, а снятие припуска осуществляется при высоких скоростях резания, то времени между резаниями двух соседних зубьев недостаточно для полного успокоения детали после возбуждения предыдущим зубом фрезы. В этом случае врезание последующего зуба осуществляется при совершении деталью свободных затухающих колебаний. Данный параметр (точка врезания фрезы) позволяет определить величину отклонения детали от положения равновесия -  $\Delta_{вр}$ , в момент начала резания. При этом в зависимости от положения детали в момент начала резания может изменяться фактический снимаемый припуск, так как амплитуды колебаний тонкостенных деталей при фрезеровании могут быть сравнимыми с величиной припуска на обработку. Особенно данный параметр является важным для встречного фрезерования, так как начало контакта фрезы с деталью является началом зоны профилирования, в которой формируется профиль обработанной поверхности.

2. **Время прохождения дуги контакта  $\tau_{д.к.}$ .** Определение данного параметра необходимо для вычисления коэффициента фактического резания  $k_{ф.р.}$ .

3. **Время резания  $\tau_{рез.}$**  Определение данного параметра необходимо для вычисления коэффициента фактического резания  $k_{ф.р.}$ :

$$k_{ф.р.} = (\tau_{рез.1} + \tau_{рез.2} + \dots + \tau_{рез.n}) / \tau_{д.к.} \quad (1.1)$$

где  $n$  – количество врезаний зуба фрезы на дуге контакта.

Коэффициент фактического резания показывает отношение суммарного времени резания зуба фрезы при прохождении дуги контакта. Если значение данного параметра меньше 1, то при фрезеровании наблюдается выход зуба из зацепления с припуском в пределах дуги их контакта. Чем меньше значение  $k_{ф.р.}$  и чем больше количество выходов зуба фрезы ( $n-1$ ), тем менее стабильный процесс резания. Такие условия обработки являются недопустимыми, так как на поверхности резания остаются несрезанные участки. Если данные участки находятся в зоне профилирования, в той части поверхности резания, которая становится частью обработанной поверхности, то это приводит к существенному ухудшению шероховатости ( $R_a$ ) и размерной точности обработки. Если же несрезанные участки не находятся в зоне профилирования, то при резании последующим зубом увеличивается нагрузка на фрезу, вследствие увеличения фактической подачи на зуб.

4. **Максимальное отклонение детали от положения равновесия  $\Delta R_{от.}^{max}$ .** Данный параметр характеризует общий уровень вибраций детали.

5. **Максимальное отклонение детали от положения равновесия при резании  $\Delta R_{от.}^{max рез}$ .** В условиях выхода инструмента из зацепления с припуском в пределах дуги их контакта, а также при высокоскоростной

обработке, величина колебаний тонкостенной детали не всегда характеризует резание при больших ее отгибах. Нахождение значения максимального отклонения детали при резании является необходимым для определения параметров точности обработки [2].

**6. Отклонение детали от положения равновесия в момент выхода зуба фрезы из зацепления с припуском -  $\Delta_{\text{вых.}}$ .** Особенно важным данный параметр является для попутного фрезерования, так как конец контакта фрезы с деталью является границей зоны профилирования, зоны определяющей профиль обработанной поверхности. Поэтому определение данного параметра дает возможность прогнозирования шероховатости обработанной поверхности в условиях работы в скоростном диапазоне появления регенеративных автоколебаний.

Положение детали в момент выхода фрезы из зацепления с припуском (точка выхода фрезы) является более нестабильным параметром, чем положение точки врезания (рис. 3), так как выход инструмента зависит от условий автоколебательного процесса во время резания. Если точку врезания зуба часто можно определить по осциллограмме отклонения детали, как точку изменения траектории ее движения, то определение точки выхода является невозможным в связи с тем, что в данном случае смены траектории движения детали не происходит. Таким образом, определение точки выхода зуба из зоны резания возможно только с помощью сигнала наличия контакта, который предусмотрен в описанном стенде.

На рис. 3 показаны возможные виды условий контактирования инструмента с деталью при фрезеровании тонкостенных деталей. Условия контактирования зависят от скорости вращения шпинделя. При малых числах оборотов шпинделя ( $n_1=224$  об/мин) коэффициент фактического резания –  $k_{ф.р}=1$  (рис. 3а). Другими словами, время резания соответствует времени прохождения дуги контакта зуба с деталью. Максимальное отклонение детали от положения равновесия –  $\Delta_{\text{рот.}}^{\text{max}}$  совпадает с максимальным отклонением детали от положения равновесия при резании –  $\Delta_{\text{рот.}}^{\text{max рез.}}$ .

При увеличении частоты вращения шпинделя ( $n_2=710$  об/мин) наблюдается появление регенеративных автоколебаний (рис. 3б). В связи с этим обычно происходит выход инструмента из зацепления с припуском в течение резания на дуге контакта. При таких условиях обработки количество выходов и коэффициент фактического резания –  $k_{ф.р}$  зависит от характеристик жесткости УС тонкостенной детали, частоты и размаха автоколебаний, режимов резания, а также геометрии и размера инструмента. Выходы зуба из зацепления, как правило не продолжительные, поэтому значения  $\Delta_{\text{рот.}}^{\text{max}}$  и могут не совпадать, однако разница в их величине является несущественной. При дальнейшем увеличении числа оборотов ( $n_3=1800$  об/мин) регенеративные автоколебания выражаются, однако резание остается прерывистым в пределах дуги контакта зуба с деталью.

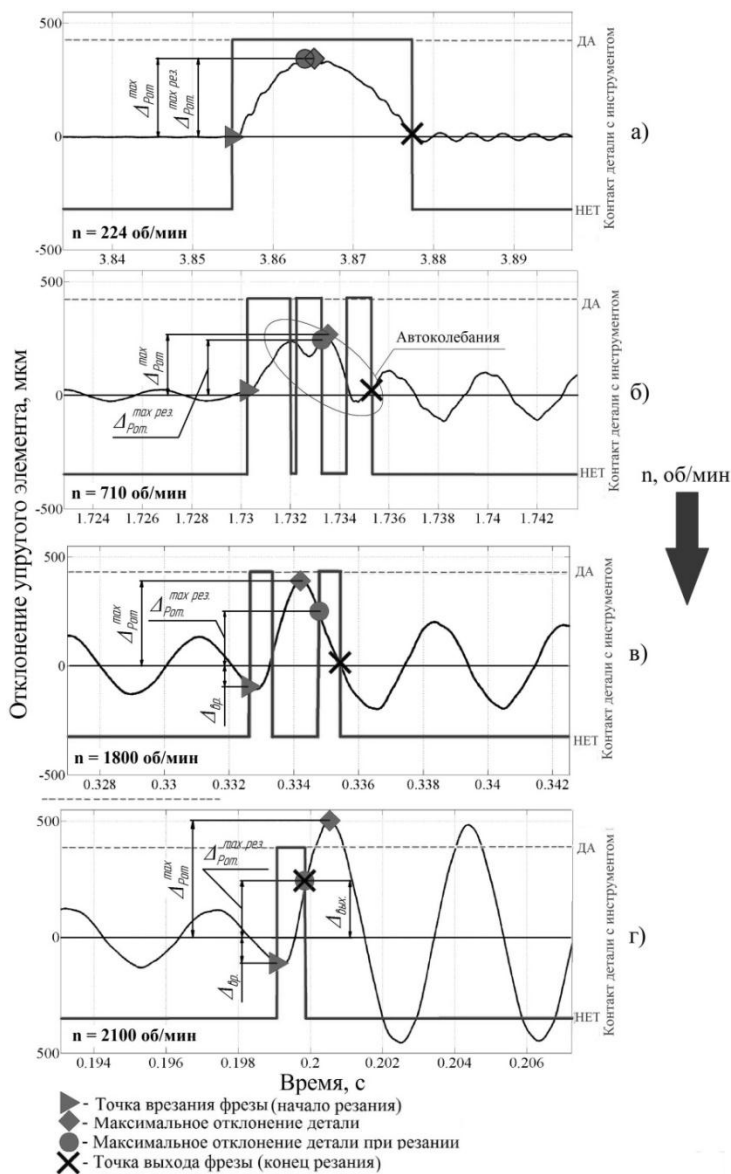


Рисунок 3 – Изменение вида контактирования зуба фрезы с тонкостенной деталью при увеличении скорости вращения шпинделя

На рис. 3в показано, что резание происходит только в начале и в конце дуги контакта. Такое явление может наблюдаться, когда жесткости детали не достаточно, чтобы противостоять силе резания, и деталь выходит из контакта с фрезой после непродолжительного резания и отклоняется в сторону действия вынуждающей силы. При этом скорость резания еще не столь велика, чтобы зуб фрезы успел уйти от повторного контакта с деталью, которая совершает свободные колебания и резание происходит снова. В таком случае время выхода инструмента из зацепления является продолжительным, по сравнению с  $\tau_{д.к.}$ , и зависит от частоты собственных колебаний детали. Величины  $\Delta_{р.от.}^{max.}$  и  $\Delta_{р.от.}^{max.рез.}$ , как правило, значительно отличаются. Таким образом, в данном случае вибрации, которые фиксируются во время обработки, не могут точно характеризовать процесс резания. При дальнейшем увеличении частоты вращения шпинделя (рис. 3г) резание происходит без выхода инструмента из зацепления с деталью в пределах дуги их контакта, а коэффициент фактического резания -  $k_{ф.р} = 1$ . В этом случае время резания соответствует времени прохождения дуги контакта инструмента с деталью. После осуществления процесса снятия припуска наблюдается дальнейшее отклонение детали по направлению действия силы отжима. При этом максимальное отклонение детали от положения равновесия -  $\Delta_{р.от.}^{max.}$  и максимальное отклонением детали от положения равновесия при резании -  $\Delta_{р.от.}^{max.рез.}$  существенно отличаются. То есть в данном случае максимальные отклонения детали не характеризуют процесс резания.

#### Выводы:

Разработанная методика оценки условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при её концевом фрезеровании позволяет определять:

1. положение детали в момент начала резания (точка врезания фрезы) –  $\Delta_{вр.}$ ,
2. время прохождения дуги контакта фрезы с деталью -  $\tau_{д.к.}$ ,
3. время резания  $\tau_{рез.}$ ,
4. коэффициент фактического резания -  $k_{ф.р}$ ,
5. максимальное отклонение детали от положения равновесия –  $\Delta_{р.от.}^{max.}$ ,
6. максимальное отклонение детали от положения равновесия при резании –  $\Delta_{р.от.}^{max.рез.}$ ,
7. положение детали в момент выхода зуба фрезы из зацепления с припуском (точка выхода фрезы) –  $\Delta_{вых.}$

Определение данных параметров позволяет расширить представление об условиях контактирования в зоне резания и особенностях срезания припуска при концевом фрезеровании тонкостенных деталей.

**Список использованной литературы:** 1. Пат. UA 94974 МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02, Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей, *Логомів Віктор Олексійович, Гермашев Антон Ігорович, Дядя Сергій Іванович, Козлова Олена Борисівна* - u201405981; заявл 02.06.2014; опубл 10.12.2014. 2. *Mamalis, A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Kundrak J.*: Simulation of effects of metal phase in a diamond grain and bonding type on temperature in diamond grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58/2012 pp. 195-200 DOI: 10.1007/s00170-011-3382-7.

**Bibliography (transliterated):** 1. Pat. UA 94974 МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02, Стенд длja doslidzhennja kolivan' pri kincevomu cilindrichnomu frezeruvanni tonkostinnih elementiv detalej, *Logominov Viktor Oleksijovich, Germashev Anton Igorovich, Djadja Sergij Ivanovich, Kozlova Olena Borisivna* - u201405981; zajavl 02.06.2014; opubl 10.12.2014. 2. *Mamalis, A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Kundrak J.*: Simulation of effects of metal phase in a diamond grain and bonding type on temperature in diamond grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58/2012 pp. 195-200 DOI: 10.1007/s00170-011-3382-7.

*Поступила в редколлегию 19.07.2015*